



ПУШКАРЁВ Сергей Юрьевич

**ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ МАГНИЕВЫХ
СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Mg-Al-Si И РАЗРАБОТКА
ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ
ОТЛИВОК ЛИТЬЕМ ПОД ДАВЛЕНИЕМ**

Специальность 05.16.04 - «Литейное производство»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург - 2010

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Пермский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Игнатов Михаил Николаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Кечин Владимир Андреевич

кандидат технических наук
Сулицин Андрей Владимирович

Ведущая организация: ОАО «Авиадвигатель», г. Пермь

Защита состоится 28 мая 2010 года в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.285.05 при Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Уральский государственный технический университет–УПИ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина» в зале Ученого Совета (ауд. I) по адресу: 620002, г. Екатеринбург, К-2, ул. Мира, 19, УГТУ-УПИ

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный гербовой печатью, просим направлять по адресу: 620002, г. Екатеринбург, К-2, ул. Мира, 19, УГТУ-УПИ, ученому секретарю. Факс: (343) 374-38-84. E-mail: kafedralp@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Уральский государственный технический университет–УПИ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина».

Автореферат разослан «26» апреля 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
профессор, доктор технических наук

С. В. Карелов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Магниевого сплавы обладают многими преимуществами по сравнению с другими сплавами на основе цветных металлов: очень малым удельным весом, высокой удельной прочностью и удельной жесткостью, высокой способностью поглощать энергию удара и вибрационных колебаний. Поэтому они широко используются во многих отраслях промышленности.

В настоящее время почти 90 % выпускаемых магниевых сплавов потребляется автомобильной промышленностью. Причем, в течение последних 15 лет ежегодный рост потребления составлял в среднем 12 %. Если указанная тенденция не изменится, то в ближайшем будущем автомобильная промышленность по объему использования магния выйдет на первое место. Повышенный интерес к магниевым сплавам вызван стремлением автомобилестроителей уменьшить массу выпускаемых автомобилей за счет применения более легких конструкционных материалов.

Из всех частей автомобиля двигатель и трансмиссия являются наиболее перспективными и самыми проблемными узлами для применения сплавов на основе магния. В настоящий момент для литья под давлением, являющимся основным способом массового производства магниевых автокомпонентов, используется очень небольшая номенклатура стандартных сплавов систем Mg-Al-Zn (AZ91, MJ15) и Mg-Al (AM60, AM50). Свойства данных сплавов не соответствуют требованиям автомобилестроения, предъявляемым к свойствам материалов литых деталей двигателя и трансмиссии, работающих при повышенных температурах. Низкое сопротивление ползучести сплавов систем Mg-Al-Zn и Mg-Al при температуре эксплуатации до 150 °C приводит к ослаблению болтовых соединений корпусных деталей, что в свою очередь приводит к утечке смазочных материалов, появлению шума и вибрации.

Для повышения сопротивления ползучести в состав магниевых сплавов вводят тугоплавкие и редкоземельные легирующие элементы. Известные жаропрочные и теплостойкие сплавы, разработанные для авиационной промышленности, являются дорогими и нетехнологичными для литья под давлением.

Одной из наиболее перспективных систем для разработки сплавов,

обладающих большим сопротивлением ползучести, чем сплавы систем Mg-Al-Zn, Mg-Al и пригодных для литья под давлением является система Mg-Al-Si. Сегодня известны два недорогих зарубежных сплава данной системы AS41 и AS21. Каждый из них имеет свои преимущества и недостатки. Сплав AS21 обладает хорошим сопротивлением ползучести, но низкими литейными свойствами. Сплав AS41 наоборот - хорошими литейными свойствами и невысоким сопротивлением ползучести. Выявленные недостатки сплавов ограничивают их применение в производстве крупногабаритных деталей трансмиссии, таких как картер коробки передач и картер сцепления. Для изготовления данных деталей требуются магниевые сплавы, сочетающие хорошие литейные свойства и приемлемый уровень сопротивления ползучести при температуре до 150 °C.

Необходимо отметить, что особенности формирования структуры и свойств сплавов системы Mg-Al-Si при литье под давлением исследованы недостаточно. Установленный факт повышенной теплостойкости данных сплавов не имеет убедительного теоретического подтверждения. В литературе не освещены вопросы о технологии приготовления магниевых сплавов, легированных кремнием.

Недостаток вышеуказанных данных и большая потребность автомобильной промышленности в новых теплостойких магниевых сплавах для литья под давлением, имеющих невысокую стоимость обуславливают важность и актуальность проблемы в области создания новых композиций сплавов системы Mg-Al-Si для нужд автомобилестроения.

Цель работы. Изучение закономерностей изменения структуры и свойств магниевых сплавов системы Mg-Al-Si, предназначенных для литья под давлением крупногабаритных отливок деталей и обладающих повышенным сопротивлением ползучести при температуре до 150 °C. Разработка технологии получения магниевых сплавов системы Mg-Al-Si с заданными свойствами.

Основное внимание было уделено решению следующих задач:

- обоснованному выбору состава нового теплостойкого сплава системы Mg-Al-Si для литья крупногабаритных отливок на основе анализа теплофизических и других свойств с учетом современных достижений в области технологии литья под давлением;

- построению политермических, изотермических разрезов тройной диаграммы состояния Mg-Al-Si в области концентраций основных компонентов нового сплава с целью изучения процесса кристаллизации при литье под давлением;
- исследованию формирования структуры и основных свойств нового сплава;
- изучению роли легирующих элементов и температуры испытания на изменение механических свойств магния при повышенных температурах;
- созданию ресурсосберегающей технологии приготовления сплавов системы Mg-Al-Si.

Научная новизна работы.

1. Построены политермические разрезы тройной диаграммы состояния Mg-Al-Si в области магниевых углов при постоянном содержании кремния 1 % и алюминия 3 %, а также изотермические разрезы при температурах 600, 450 и 300 °С.
2. Установлены и расширены представления о механизме формирования микроструктуры и свойств отливок из магниевых сплавов системы Mg-Al-Si в условиях литья под давлением.
3. Установлены условия обеспечения повышенного сопротивления ползучести отливок из сплавов системы Mg-Al-Si при повышенных температурах эксплуатации.

Практическая значимость.

1. Разработан новый сплав AS31HP системы Mg-Al-Si для изготовления крупногабаритных отливок деталей трансмиссии автомобиля литьем под давлением, обладающий хорошими литейными свойствами и повышенным сопротивлением ползучести при температуре эксплуатации до 150 °С. Химический состав сплава AS31HP и способ его приготовления защищены патентами РФ и США.
2. Разработана и внедрена на предприятии ОАО «Корпорация ВСМПО - АВИСМА» технология приготовления нового сплава AS31HP с использованием специальной лигатуры Al-Si-Mn. Сплав AS31HP успешно апробирован и внедрен в производство отливок картеров автоматических коробок передач методом литья под давлением автомобилестроительной компанией DaimlerChrysler.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на семинаре «Состояние и перспективы

производства магния и магниевых сплавов в России», г. Березники, 2001г.; Международной научно - технической конференции молодых специалистов и ученых алюминиевой, магниевой и электродной промышленности, г. Санкт - Петербург, 2002 г.; областной научной конференции молодых ученых, студентов и аспирантов, г. Пермь, 2002 г.; ежегодных (2002 – 2009 г.г.) отчетных научно - технических советах ОАО «Корпорация ВСМПО - АВИСМА».

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 10 научных статей и тезисов докладов, в том числе 3 статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, получено 2 патента.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов по работе, библиографического списка из 115 наименований, изложена на 135 страницах машинописного текста, содержит 23 таблицы, 39 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы ее основная цель и задачи, приведены основные научные положения, выносимые на защиту, а также показана практическая значимость результатов работы.

Глава 1. Состояние вопроса

В главе представлен обзор технической литературы, касающийся проблемы применения и изготовления литьем под давлением отливок крупногабаритных деталей из магниевых сплавов, предназначенных для работы при повышенных температурах.

Для производства отливок методом литья под давлением используется небольшая номенклатура стандартных магниевых сплавов систем Mg-Al-Zn и Mg-Al (табл. 1). Основной проблемой, препятствующей широкому использованию данных сплавов для литья под давлением крупногабаритных отливок деталей двигателя и трансмиссии, является их низкое сопротивление ползучести при температуре до 150 °С, которое приводит в процессе эксплуатации к ослаблению болтовых соединений корпусных деталей и, как следствие, к утечке смазочных материалов, повышению уровня шума и вибрации.

Таблица 1

Номенклатура стандартных магниевых сплавов для литья под давлением

Система	Марка сплава	Страна	Содержание элементов, мас. % (магний – основа)							
			легирующие			примеси, не более				
			Al	Zn	Mn	Si	Fe	Ni	Cu	Прочие
Mg-Al-Zn	AZ91	США	8,5-9,5	0,45-0,90	не менее 0,17	0,05	0,004	0,001	0,015	0,01
	MgAl9Zn1	Германия	8,5-9,5	0,45-0,90	не менее 0,17	0,05	0,004	0,001	0,025	0,01
	MC 2	Япония	8,1-9,3	0,4-1,0	0,13-0,50	0,30	-	0,010	0,100	-
	МЛ15	Россия	7,5-9,0	0,2 - 0,8	0,15-0,50	0,25	0,080	0,010	0,100	всего 0,50
Mg-Al	AM60	США	5,7 - 6,3	-	не менее 0,27	0,05	0,004	0,001	0,008	0,01
	AM50	США	4,5-5,3	-	0,28-0,50	0,05	0,004	0,001	0,008	0,02

Для обеспечения повышенного сопротивления ползучести разработаны магниевые сплавы, содержащие как дорогие, так и легкодоступные элементы. Однако известные жаропрочные и теплостойкие сплавы с редкоземельными металлами по причине низких литейных свойств непригодны для литья под давлением. Недорогие сплавы системы Mg-Al-Si (табл. 2) также не лишены недостатков. Так сплав AS41, обладающий хорошими литейными свойствами, имеет недостаточно высокое сопротивление ползучести, что препятствует его применению для производства деталей, работающих при температурах до 150 °С. Сплав AS21 наоборот имеет хорошее сопротивление ползучести, но высокий уровень горячеломкости и низкая жидкотекучесть не позволяют использовать его для литья крупногабаритных отливок.

Таблица 2

Химический состав магниевых сплавов системы Mg-Al-Si, мас. %

Марка сплава	Страна	Содержание легирующих компонентов (магний – основа)			Содержание примесей, не более				
		Al	Si	Mn	Zn	Fe	Ni	Cu	Прочие
AS41	Канада	3,7-4,8	0,6-1,4	0,35–0,60	0,1	0,004	0,001	0,015	0,01
AS21	Канада	1,9-2,5	0,7-1,2	не менее 0,20	0,2	0,004	0,001	0,080	0,01

Очевидно, что система Mg-Al-Si является перспективной для разработки новых магниевых сплавов с повышенным сопротивлением ползучести при

температуре до 150 °С и хорошими литейными свойствами, позволяющими изготавливать литьем под давлением отливки крупногабаритных деталей.

Однако имеющиеся сведения по вопросу формирования структуры и свойств сплавов системы Mg-Al-Si недостаточны и не имеют убедительного теоретического подтверждения. Отсутствует информация по технологии приготовления магниевых сплавов с кремнием.

В результате выполненного анализа литературных данных по рассматриваемой в работе проблеме сформулированы задачи диссертационной работы.

Глава 2. Методики исследования

В ходе проведения работы использованы как стандартные, так и оригинальные методики. Перечислены характеристики материалов и оборудования для проведения лабораторных и промышленных экспериментов.

Механические и литейные свойства сплавов изучали на образцах и технологических пробах, отлитых на машине литья под давлением с холодной горизонтальной камерой прессования модели 71108 при постоянных параметрах литья: удельное давление прессования - 100 МПа; скорость прессования - 1 м/с; температура пресс-формы -180 - 200 °С; заливка при температуре расплава на 50 ± 10 °С выше температуры ликвидуса.

Технологические пробы (рис. 1) отливали в экспериментальную пресс-форму. Пресс-форма имеет сменные вкладыши, предназначенные для получения спиральной пробы на жидкотекучесть, тарельчатой пробы на горячеломкость, усадочная решетка

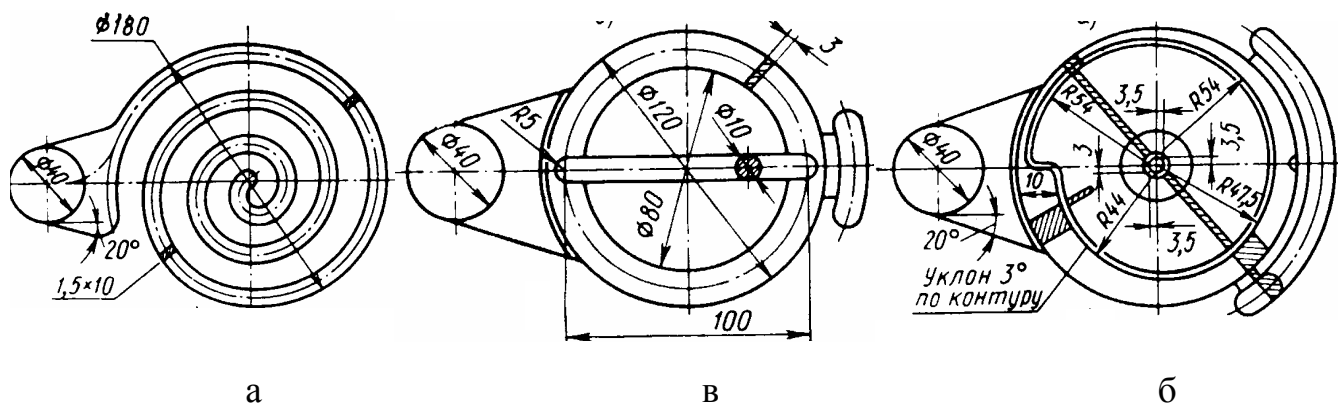


Рис. 1. Технологические пробы для изучения литейных свойств сплавов при литье под давлением: а – спиральная проба на жидкотекучесть; б – тарельчатая проба на горячеломкость; в – усадочная решетка

усадочной решетки. Жидкотекучесть определяли по длине заполненной части спирали с сечением плоского канала $1,5 \times 10$ мм. Горячеломкость оценивали по суммарной длине трещин, поразивших плоский диск пробы, окаймленной кольцевой стенкой переменного сечения. Остаточные напряжения рассчитывали по деформации центрального стержня усадочной решетки после разрезки.

Глава 3. Кристаллизация сплавов системы Mg-Al-Si при литье под давлением

На основании литературного обзора установлено:

- чем больше алюминия в магниевом сплаве, тем выше его литейные свойства. В связи с этим сплав AS41, содержащий в среднем 4 % алюминия, имеет лучшие литейные свойства, чем сплав AS21 со средним содержанием алюминия 2 %;
- чем больше алюминия в сплаве, тем ниже его сопротивление ползучести при повышенных температурах. Поэтому сплав AS21 пригоден для изготовления отливок деталей, работающих при температуре до 170°C , а сплав AS41 только до температуры 140°C ;
- нижняя и верхняя границы содержания кремния в сплавах AS41 (0,6 - 1,4 %) и AS21 (0,7 - 1,2 %) определены экспериментальным путем. При содержании кремния в пределах установленных границ данные сплавы имеют наибольшее сопротивление ползучести.

При сопоставлении результатов анализа литературных данных и условий задачи по разработке нового магниевого сплава системы Mg-Al-Si для литья под давлением крупногабаритных деталей, работающих при температуре до 150°C , стало очевидным, что новый сплав должен иметь содержание алюминия выше, чем в сплаве AS21, но не более чем в сплаве AS41. Содержание кремния на уровне сплавов AS21 и AS41. В этом случае новый сплав может превосходить сплав AS21 по литейным свойствам, а сплав AS41 по сопротивлению ползучести, что позволит достичь поставленной задачи.

Таким образом, с учетом вышесказанного, уже на начальном этапе работы были установлены средние содержания алюминия и кремния в новом сплаве на уровне $\sim 3\%$ и $\sim 1\%$, соответственно. Дополнительно в сплав были включены

цинк, бериллий и марганец по причине их положительного влияния на отдельные свойства и характеристики магниевых сплавов. Цинк повышает пластичность и снижает горячеломкость сплавов, бериллий препятствует окислению расплавов, марганец повышает коррозионную стойкость. Пределы содержания данных компонентов были установлены с учетом известного опыта.

Ниже представлен химический состав предлагаемого нового сплава: магний-основа; алюминий - 2,5 - 3,4 %; кремний - 0,8 - 1,1 %; цинк - 0,11 - 0,25 %; марганец - 0,24 - 0,34 %; бериллий – 0,0005 - 0,0015 %; железо не более 0,004 %; медь не более 0,008 %; никель не более 0,001 %. Впоследствии новому сплаву была присвоена марка AS31HP. Буквы HP обозначают, что сплав имеет низкий уровень содержания примесей железа, меди и никеля, которые понижают коррозионную стойкость сплава.

В системе Mg-Al-Si подробно изучен алюминиевый угол, являющийся основой для анализа фазовых равновесий сплавов, относящихся к группе силуминов. В области магниевого угла сведения крайне ограничены только указанием положения точек двойных эвтектик и точки тройной эвтектики, а также фазовых полей при высоких содержаниях алюминия и кремния.

С целью анализа процесса кристаллизации и фазового состава опытного сплава AS31HP и других сплавов системы Mg-Al-Si, в виду отсутствия требуемой информации выполнено графическое построение двух политермических разрезов тройной диаграммы состояния Mg-Al-Si при постоянном содержании алюминия 3 % и кремния 1 % (рис. 2), а также трех изотермических разрезов при различных температурах.

Разрезы были построены путем анализа данной диаграммы посредством метода сингулярной триангуляции и основываясь на процессах кристаллизации типичных сплавов простой тройной эвтектической системы с учетом того, что при литье под давлением магниевых сплавов, принадлежащих двойной системе Mg-Al растворимость алюминия в магнии практически постоянна и равна 1 %, а в сплавах системы Mg-Si предельная растворимость кремния в магнии очень мала, поэтому ею можно пренебречь.

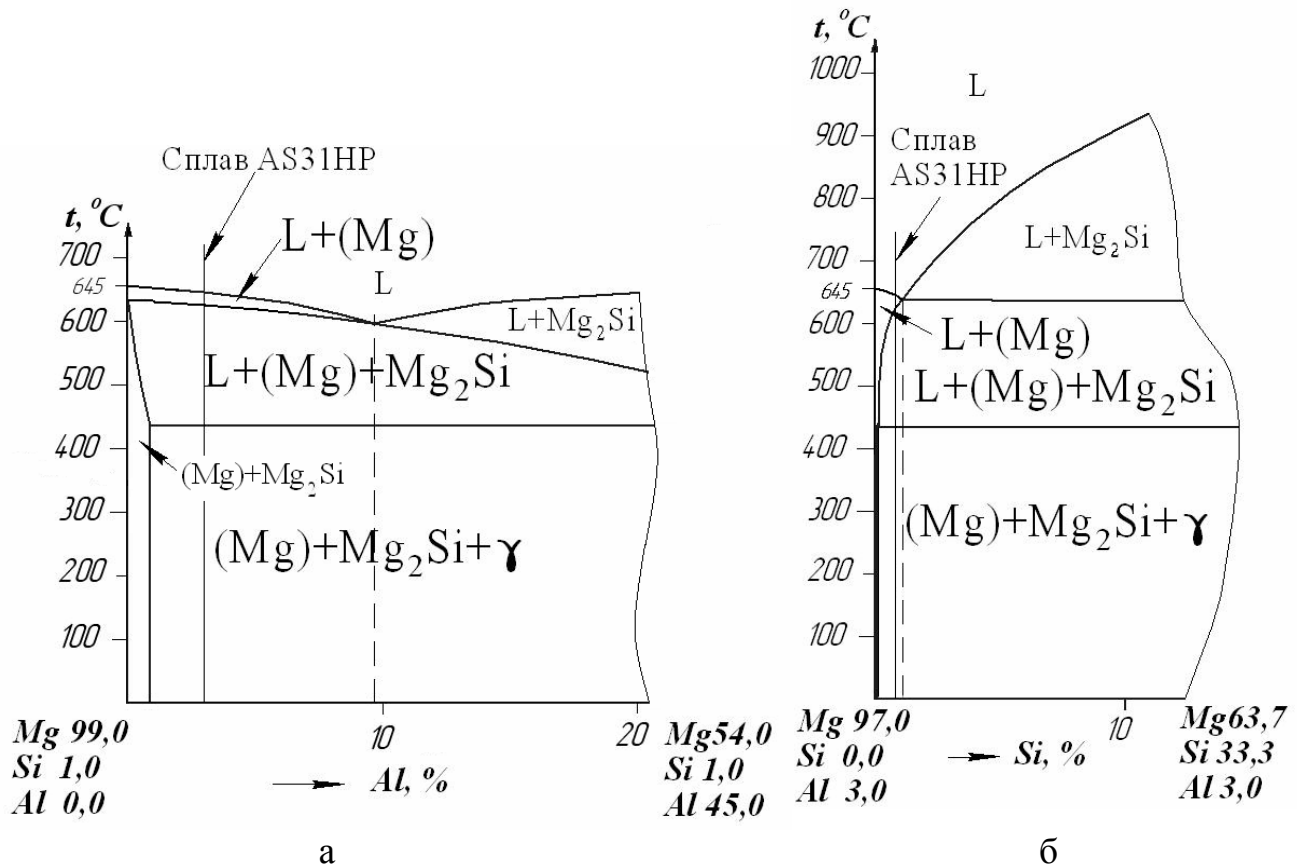


Рис. 2. Политермические разрезы диаграммы Mg-Al-Si при постоянном содержании кремния 1% (а) и алюминия 3% (б)

В результате анализа разрезов установлено, что опытный сплав AS31HP в процессе охлаждения кристаллизуется следующим образом. На первой стадии охлаждения температура сплава снижается, начиная с температуры заливки до температуры начала кристаллизации $\sim 645^{\circ}\text{C}$. На второй стадии в интервале температур $\sim 645 - 638^{\circ}\text{C}$ в сплаве протекает процесс выделения из расплава первичных кристаллов твердого раствора на основе магния ($L \rightarrow (\text{Mg})$). В интервале температур $\sim 638 - 435^{\circ}\text{C}$ начинается и заканчивается третья стадия - кристаллизация двойной эвтектики ($L \rightarrow (\text{Mg}) + \text{Mg}_2\text{Si}$). В ходе четвертой стадии охлаждения при постоянной температуре 435°C из оставшейся жидкой фазы кристаллизуется тройная эвтектика ($L \rightarrow (\text{Mg}) + \text{Mg}_2\text{Si} + \gamma$ - $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$). Пятая стадия реализуется уже в твердом состоянии сплава без изменения фазового состава.

Пользуясь правилом отрезков и участком тройной диаграммы состояния Mg-Al-Si, выполнен расчет относительных массовых долей структурных составляющих и фаз в составе опытного сплава (табл. 3).

Результаты расчетов по определению массовых долей структурных составляющих в сплаве AS31HP, %

Метод расчета	Твердый раствор на основе магния	Двойная эвтектика	Тройная эвтектика
Правило отрезков	24,1	65,6	10,3
Линейный метод	$27,8 \pm 9,6$	62,9	$9,3 \pm 2,8$

Очевидно, процесс формирования структуры сплава AS31HP с участием перечисленных фаз и в соответствии с протекающими превращениями происходит следующим образом. На второй стадии охлаждения в жидкости появляются разделенные в пространстве первичные кристаллы твердого раствора на основе магния. На третьей стадии на образовавшихся поверхностях раздела жидкой и твердой фаз кристаллизуется двойная эвтектика. Объем и размеры твердого раствора и двойной эвтектики на второй и третьей стадиях достаточен для того, чтобы между кристаллическими образованиями возникли мостики, спайки. В результате формируется своеобразный пространственный «каркас» из двойной эвтектики вокруг зерен первичного твердого раствора. В промежутках (ячейках) «каркаса» остаются очаги маточной жидкости, затвердевание которой протекает по механизму кристаллизации тройной эвтектики. Аналогичным образом формируется структура сплавов AS41 и AS21.

С целью подтверждения выводов, сделанных на основании анализа построенных разрезов относительно формирования структуры и фазового состава выполнены металлографические исследования и рентгеноструктурный анализ образцов сплава AS31HP.

В микроструктуре сплава (рис. 3) отчетливо наблюдаются светлые дендриты первичных кристаллов твердого раствора на основе магния. Дендриты практически полностью окружены двойной эвтектикой (Mg)+Mg₂Si, образующей своеобразную сетку («каркас»). В двойной эвтектике вкраплены темные участки, относящиеся к включениям тройной эвтектики (Mg)+Mg₂Si+γ.

Рентгеноструктурный анализ показал, что на дифрактограмме сплава AS31HP помимо линий, принадлежащих твердому раствору на основе магния (параметр решетки $a = 0,32094$ нм, $c = 0,52107$ нм), присутствует ряд дополнительных

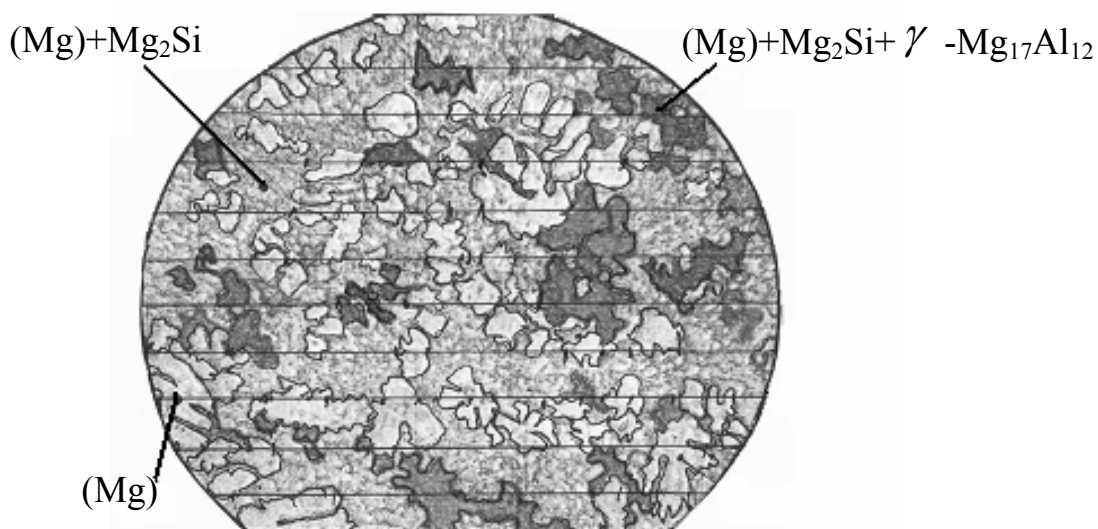


Рис. 3. Микроструктура образцов сплава AS31HP, полученных литьем под давлением: (Mg)–первичные дендриты твердого раствора на основе магния; (Mg)+Mg₂Si – «каркас» из двойной эвтектики (светлое поле); (Mg)+Mg₂Si+ γ -Mg₁₇Al₁₂ – включения тройной эвтектики (темные поля) (увеличение × 225)

рефлексов, соответствующих фазам Mg₂Si (параметр решетки $a = 0,6351$ нм) и Mg₁₇Al₁₂ (параметр решетки $a = 1,048$ нм). Данное заключение полностью подтверждает ранее сделанный вывод о фазовом составе сплава.

Выполнили расчет относительных массовых долей структурных составляющих линейным методом по изображению микроструктуры сплава AS31HP (табл. 3). Результаты расчетов имеют хорошую сходимость с данными, полученными с помощью «правила отрезков», что свидетельствует об их достоверности.

С целью объяснения причин повышенного сопротивления ползучести нового сплава AS31HP выполнили анализ свойств фаз, формирующих структуру данного сплава. Твердый раствор на основе магния, имеющий температуру плавления 650 °С, является мягкой пластичной фазой. Фаза Mg₂Si – силицид магния образуется при содержании кремния 33,3 ат. % и плавится при температуре 1085 °С. В кристаллическом состоянии при комнатной температуре характеризуется высокой микротвердостью H_μ – 4482. Фаза Mg₁₇Al₁₂ (γ-фаза) образуется при содержании алюминия в интервале 41-48 ат. % и имеет температуру плавления 462 °С. Микротвердость фазы Mg₁₇Al₁₂ при комнатной температуре меньше в два раза, чем у фазы Mg₂Si и составляет H_μ – 2226. При нагреве до 300 °С разупрочнение фазы Mg₂Si происходит в 1,5 раза, тогда как фазы Mg₁₇Al₁₂ почти в

5 раз. Фаза Mg_2Si при повышении температуры сплава до $435\text{ }^{\circ}C$ обладает высокой устойчивостью против растворения благодаря отсутствию изменения растворимости ее в магниевой основе.

Рассмотренные фазы не только отличаются разными температурами плавления, но и при кристаллизации формируют эвтектики с различными температурами затвердевания (табл. 4).

Таблица 4

Характеристики двойных и тройной эвтектик магниевых сплавов

Эвтектическая реакция	Состав эвтектики, мас. %			Температура плавления, $^{\circ}C$
	Mg	Al	Si	
$L \rightarrow (Mg) + Mg_{17}Al_{12}$	67,7	32,3	-	437
$L \rightarrow (Mg) + Mg_2Si + Mg_{17}Al_{12}$	67,5	32,2	0,20	435
$L \rightarrow (Mg) + Mg_2Si$	98,66	-	1,34	638

На основании анализа процесса кристаллизации, формирования структуры, свойств фаз и структурных составляющих был сделан вывод, что повышенные значения сопротивления ползучести сплава AS31HP и других сплавов системы Mg-Al-Si в условиях литья под давлением вызваны образованием в процессе кристаллизации в объеме отливки практически непрерывного теплостойкого «каркаса» из двойной эвтектики $(Mg) + Mg_2Si$, имеющей температуру плавления $638\text{ }^{\circ}C$. При этом мягкая пластичная фаза - твердый раствор на основе магния и нежаропрочная тройная эвтектика $(Mg) + Mg_2Si + Mg_{17}Al_{12}$ располагаются внутри него. Для сравнения в отливках из стандартных сплавов систем Mg-Al-Zn и Mg-Al тоже образуется непрерывный «каркас», но из нетеплостойкой двойной эвтектики $(Mg) + Mg_{17}Al_{12}$, имеющей температуру плавления $437\text{ }^{\circ}C$. По этой причине данные сплавы при повышенных температурах имеют более низкие значения сопротивления ползучести, чем сплавы системы Mg-Al-Si.

Глава 4. Исследование влияния легирующих элементов на основные свойства сплавов системы Mg-Al-Si

Поскольку механические свойства сплавов при высоких температурах и жаропрочность металлов взаимосвязаны, были проведены исследования по влиянию температуры на прочностные и пластические характеристики сплава

AS31HP. Механические испытания отлитых под давлением образцов были выполнены при температуре 20, 150 и 250 °С в литом состоянии и после отжига до температуры 150 и 250 °С в течение 1 и 0,5 часа соответственно.

С целью анализа влияния алюминия для испытаний были изготовлены образцы сплава AS31HP с содержанием данного компонента, близким к верхнему и нижнему пределам, 3,2 % и 2,8 %, соответственно. В результате испытаний установлено, что нет существенных различий в прочностных показателях образцов как в литом, так и отожженном состояниях (рис. 4).

$\sigma_B, \sigma_{0.2}$, МПа

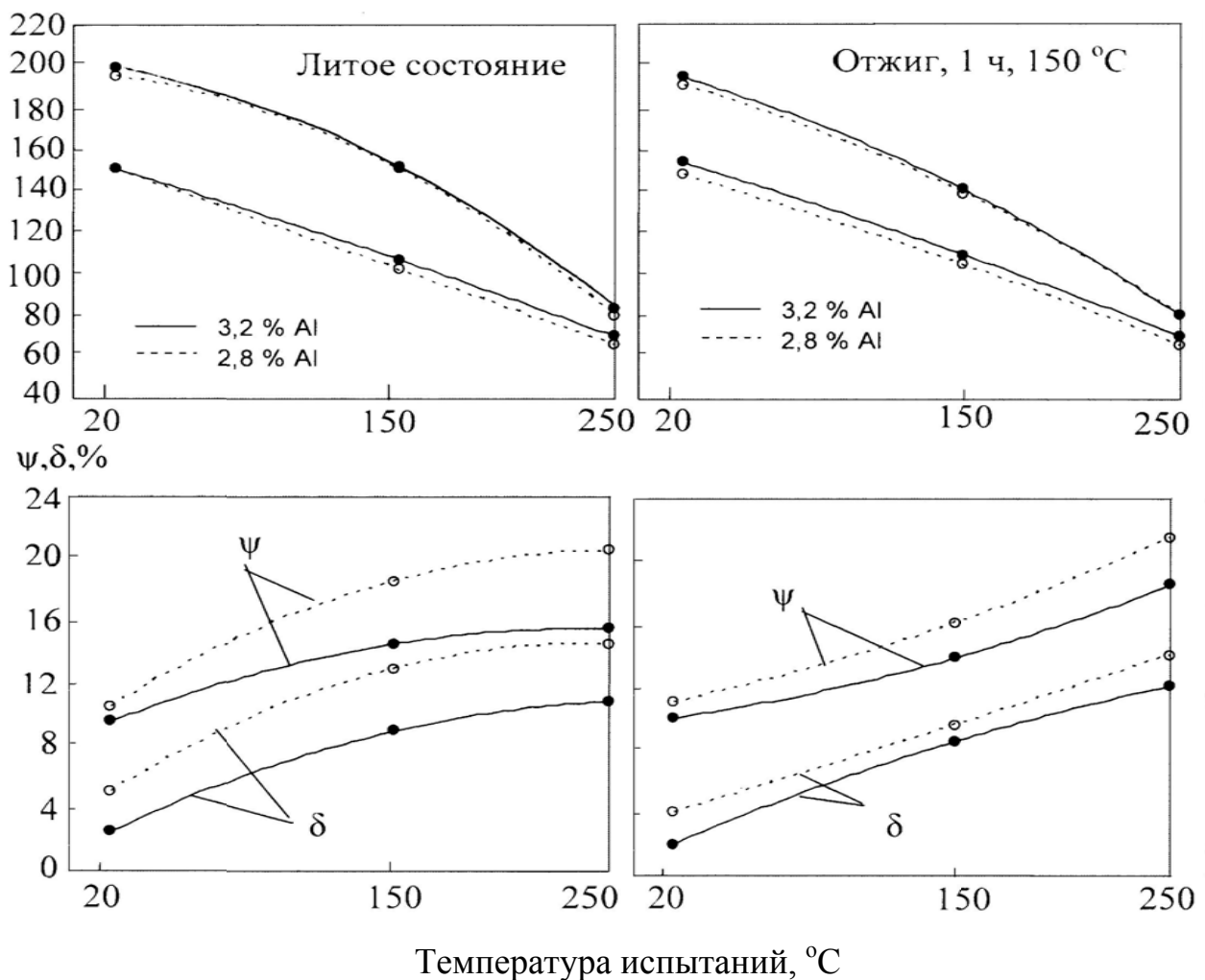


Рис. 4. Влияние алюминия на механические свойства литых и отожженных образцов из сплава AS31HP

Пластические характеристики сплава в литом состоянии с изменением содержания алюминия различаются более заметно. После проведения кратковременных отжигов (0,5 - 1,0 час) показатели пластичности образцов с 2,8 % и 3,2 % алюминия становятся практически одинаковыми. Объясняется это

тем, что при меньшем содержании легирующего элемента снятие литейных напряжений, значительно снижающих пластичность сплавов, в отожженных образцах произошло полнее.

Аналогичные исследования влияния кремния, цинка и марганца в пределах их содержания в сплаве AS31HP не выявили значительного изменения механических свойств образцов.

С целью сравнения механических свойств AS31HP со свойствами других сплавов провели испытания образцов из сплавов AS21, AS41, а также AZ91 при температурах 20, 150 и 250 °C в литом состоянии (табл. 5).

Таблица 5

Механические свойства магниевых сплавов систем Mg-Al-Si и Mg-Al-Zn

Марка сплава	σ_b , МПа				$\sigma_{0,2}$, МПа				δ , %			
	20°C	150°C	250°C	разница (2-4)	20°C	150°C	250°C	разница (6-8)	20°C	150°C	250°C	разница (12-10)
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>	<i>13</i>
AS21	199	147	87	112	141	114	76	65	4,2	5,5	8,4	4,2
AS31HP	206	149	84	122	152	110	68	84	3,2	7,2	11,1	7,9
AS41	214	151	81	133	159	105	62	97	2,6	9,1	14,3	11,7
AZ91	220	152	74	146	180	95	50	130	2,0	12,4	19,2	17,2

Установлено, что чем меньше содержится алюминия в сплаве, тем в меньшей степени он разупрочняется при повышении температуры испытаний.

Дополнительно в аналогичных условиях провели испытания образцов сплава типа AS31HP с содержанием кремния 0,44 %. Механические свойства данного сплава сравнили со свойствами сплава AS31HP с содержанием кремния 0,91 % (табл. 6).

Таблица 6

Механические свойства магниевых сплавов типа AS31HP
с различным содержанием Si

Содержание Si, %	σ_b , МПа				$\sigma_{0,2}$, МПа				δ , %			
	20°C	150°C	250°C	разница (2-4)	20°C	150°C	250°C	разница (6-8)	20°C	150°C	250°C	разница (12-10)
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>	<i>13</i>
0,91	206	149	84	122	152	110	68	84	3,2	7,2	11,1	7,9
0,44	199	134	63	136	143	90	43	100	3,8	13,4	19,3	15,5

Установлено, что чем больше содержание кремния в сплаве, тем в меньшей степени он разупрочняется при повышении температуры испытаний.

С целью оценки теплостойкости сплава AS31HP проведены испытания образцов, отлитых под давлением на ползучесть. Для определения характера ползучести сплава в условиях эксплуатации корпусных деталей трансмиссии автомобиля испытания выполнили при температуре 150 °С и напряжении 35 МПа. Продолжительность выдержки образцов под нагрузкой последовательно увеличивали с 25 до 100 часов. Для сравнения в аналогичных условиях провели испытания сплавов AZ91, AS21 и AS41 (рис. 5). Из рисунка видно что, сплав AS31HP по сопротивлению ползучести превосходит сплав AS41 и уступает сплаву AS21. Деформация образцов данных сплавов с течением времени затухает. Вид экспериментальных кривых сплавов AS31HP, AS41 и AS21 совпадает по характеру с теоретической кривой низкотемпературной ползучести, а сплава AZ91 с кривой высокотемпературной ползучести, которая является неприемлемой для корпусных деталей двигателя и трансмиссии.

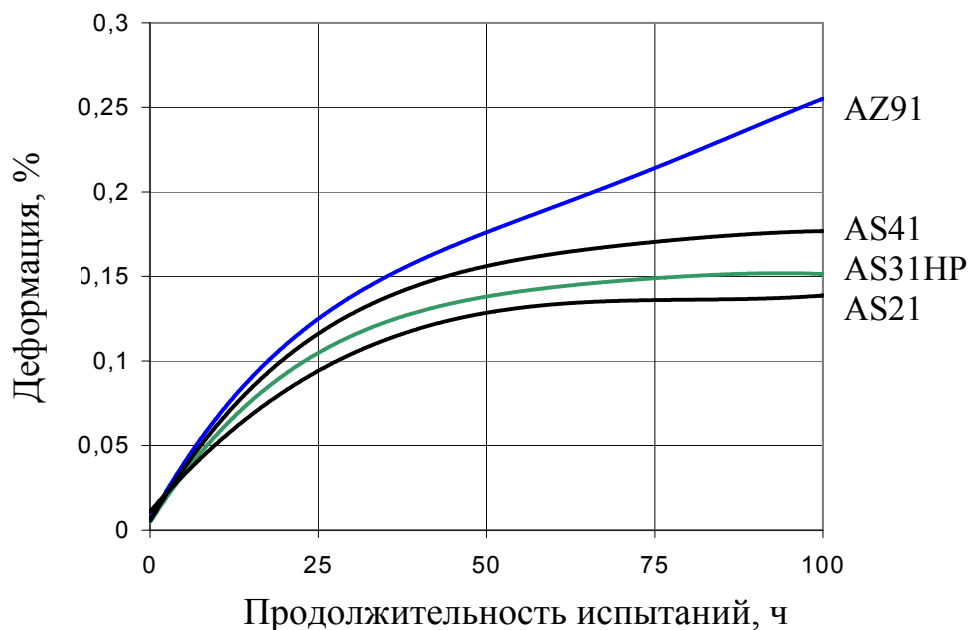


Рис. 5. Влияние продолжительности испытания на изменение ползучести магниевых сплавов

В результате обработки экспериментальных данных установлена закономерность ползучести сплава AS31HP от продолжительности испытания образцов под нагрузкой 35 МПа при температуре 150 °С, которая описывается

следующим уравнением: $\delta = 3,57 \times \ln t - 3,4$.

Результаты исследования влияния величины приложенного напряжения в диапазоне 35 - 55 МПа при температуре 150 °С в течение 100 часов на ползучесть образцов сплавов AS31HP, AS21, AS41 и AZ91 (рис. 6), свидетельствуют об

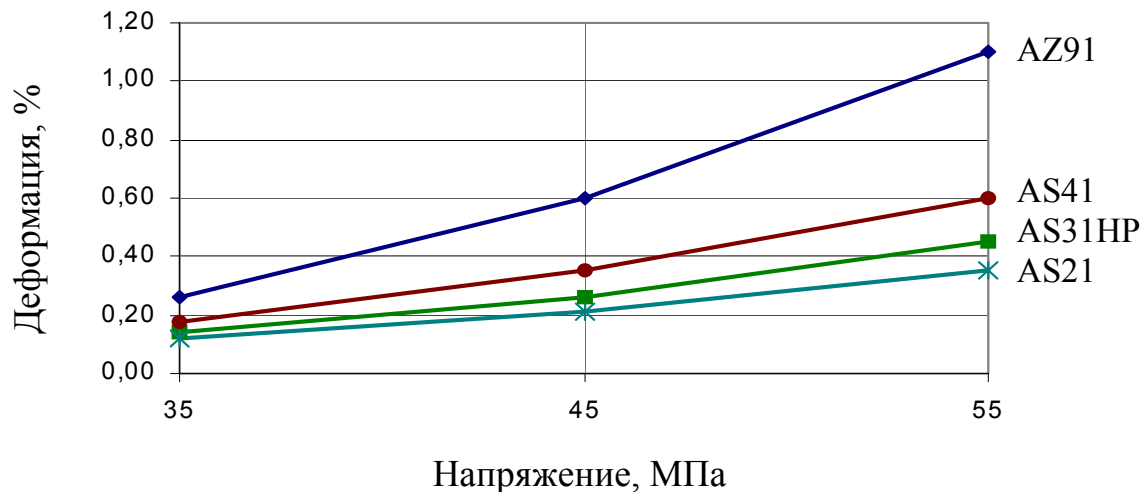


Рис. 6. Влияние величины напряжения на изменение ползучести магниевых сплавов

увеличении деформации сплавов при повышении нагрузки. Причем, чем меньше алюминия и больше кремния содержится в сплаве, тем в меньшей степени он склонен к деформации при увеличении нагрузки.

В ходе работы провели оценку литейных свойств сплава AS31HP на специальных пробах, отлитых под давлением. Для сравнения в аналогичных условиях изготовили пробы из сплавов AS21, AS41 и AZ91 (табл. 7).

Таблица 7.

Литейные свойства магниевых сплавов при литье под давлением

Марка сплава	Жидкотекучесть, мм	Горячеломкость, мм	Напряжения, МПа
AZ91	394± 18	17 ± 4,1	21,5 ± 6,0
AS41	342± 14	отсутствует	20,2± 3,0
AS31HP	324± 12	отсутствует	23,2 ± 4,7
AS 21	285± 13	24± 5,2	23,0± 4,1

Из табл. 8 видно, что сплав AS31HP имеет меньшую жидкотекучесть, чем сплавы AZ91 и AS41, но большую, чем сплав AS21. Новый сплав более стоек к образованию горячих трещин, чем сплавы AZ91 и AS21.

Глава 5. Разработка и исследование технологии приготовления сплава AS31HP

Характерной особенностью нового магниевого сплава AS31HP с пониженным содержанием вредных примесных элементов является присутствие в нем тугоплавких легирующих компонентов кремния, марганца, бериллия и легкоплавкого цинка. Принимая во внимание высокую химическую активность и экзотермичность магния, особенно в расплавленном состоянии, при разработке технологии приготовления сплава предпочтение было отдано использованию в шихте лигатуры, способствующей эффективному растворению в магниевых расплавах кремния и марганца.

Для приготовления сплава AS31HP была разработана лигатура на основе алюминия. Химический состав лигатуры Al-Si-Mn был подобран таким образом, чтобы обеспечить получение нужного химического состава сплава в заданных пределах по каждому легирующему компоненту: Al - основа; Si - 20,9 - 23,6 %; Mn - 6,6 - 9,4 %. Лигатуру готовили в индукционной печи ИАТ-0,4. Металлографический и рентгеноспектральный анализ показал, что микроструктура слитка полученной лигатуры (рис. 7) состоит из матричного металла, представленного двойной эвтектикой α - Si, в поле которой имеются выделения избыточных кристаллов кремния и сложной интерметаллидной фазы $Al_6(MnSiFe)$, имеющей светло - серый цвет, которая кристаллизуется в разветвленные формы или округлые частицы.

Для оценки степени усвоения легирующих компонентов из лигатуры при различных температурах расплава были проведены лабораторные плавки сплава AS31HP в печи СМТ - 0,01 со стальным тиглем емкостью 10 кг. В предварительно нагретый тигель до 600 °С заливали жидкий магний марки Мг90 (ГОСТ 804). С целью предотвращения

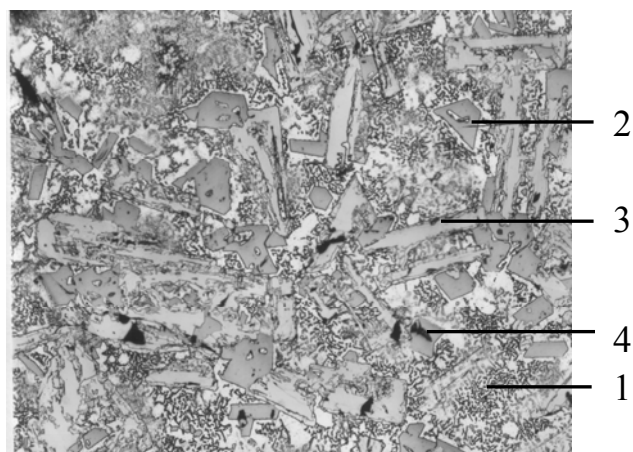


Рис. 7. Микроструктура лигатуры Al – Si – Mn ($\times 100$): 1-эвтектика α -Si; 2 - избыточные кристаллы Si; 3 – сложная интерметаллидная фаза $Al_6(MnSiFe)$, 4 – поры

горения магния поверхность расплава покрывали бариевым флюсом. При температуре расплава 690 °С в тигель загружали навеску лигатуры Al-Si-Mn из расчета 0,48 - 0,50 кг на 10 кг сплава. Температуру расплава в разных плавках поднимали до 700, 720 и 740 °С, выдерживали в течение 1 часа и перемешивали вручную в течение 2 минут. После выдержки в течение 5 минут, отбирали пробу для химического анализа сплава, затем расплав разливали в изложницы. В результате экспериментов установлено, что степень усвоения компонентов лежит в пределах: Al 98,9–100 %; Si 89,3–97,4 %; Mn 68,3–71,1 %. Наибольшая степень усвоения Si и Mn достигнута при температуре 740 °С, наименьшая при 700 °С.

На основании результатов лабораторных исследований была разработана промышленная технология приготовления сплава AS31HP в тигельных печах сопротивления СМТ-2 и СМТ-3 емкостью 2 и 3 тонны, соответственно, которая состоит из следующих операций: в нагретый до красного каления стальной тигель заливали из вакуум - ковша жидкий магний – сырец; для предотвращения горения поверхность расплава покрывали бариевым флюсом; при температуре 690 - 700 °С загружали предварительно нагретую на корпусе печи навеску лигатуры Al-Si-Mn из расчета 48-50 кг на 1 тонну сплава; повышали температуру расплава до 720 - 740 °С, устанавливали разогретую механическую мешалку и перемешивали расплав в течение 15 минут; вводили бариевый флюс в количестве 10-12 кг на тонну шихты и перемешивали 5 минут; для рафинирования от железа в расплав вводили навеску титанового плава (ТУ 39-008) в количестве 10 - 12 кг на тонну шихты в смеси с бариевым флюсом в пропорции 1:1 (мас.) и перемешивали в течение 5 минут; при температуре расплава 710 - 720 °С вводили навеску цинка марки М1 (ГОСТ 3640) в количестве 1,8 - 2 кг на тонну шихты, устанавливали перфорированную корзину с навеской лигатуры Al-Be (Be 4–6 %) в количестве 0,270 кг на тонну шихты в смеси с бариевым флюсом в пропорции 1 : 1 (мас.) и перемешивали в течение 15 минут; выдерживали расплав в течение 10 минут и отбирали пробу для химического анализа сплава; в случае положительного результата анализа плавку разливали на литейном конвейере в 8 или 12 кг чушки.

В результате анализа промышленных плавок было установлено, что:

- степень усвоения алюминия и цинка составляет ~ 100 %, кремния -

80,8 - 92,5 %, марганца - 70,7 – 73,7 %, бериллия - 59,6 – 86,3 %;

- наибольший угар имеет бериллий. Процент угара бериллия уменьшается с 40 % до 14 % при снижении температуры расплава перед вводом Al - Be лигатуры до 710-720 °С, сокращении продолжительности перемешивания расплава до 10 минут и времени приготовления сплава до 40 минут после ввода лигатуры Al-Be;
- степень усвоения марганца из лигатуры больше в среднем на 20%, чем степень усвоения марганца, вводимого в расплав в чистом виде согласно существующей на российских предприятиях промышленной технологии приготовления первичных стандартных магниевых сплавов AZ91 и AM60;
- сплав AS31HP в чушках имеет хорошее качество: неоднородности химического состава не обнаружено; излом чушек без видимых неметаллических включений; содержание водорода в слитках - 0,0007...0,0012 %, кислорода - 0,010 ... 0,020 %.

В лабораторных условиях были проведены сравнительные испытания коррозионной стойкости образцов опытного сплава AS31HP и стандартного сплава AZ91. Испытания проводили при комнатной температуре при полном погружении образцов в 3 % раствор NaCl. Установлено, что образцы опытного сплава подвергаются общим коррозионным поражениям, в то время как образцы сплава AZ91 на фоне общих поражений имеют локальные глубокие поражения. Рассчитанная по данным испытаний величина скорости коррозии изученных сплавов оказалась близкой и колебалась в пределах 0,92–1,18 г/м²×час.

Промышленное опробование сплава AS31HP проведено в Германии в цехе литья под давлением автомобильного концерна DaimlerChrysler. Из сплава на машине литья под давлением с холодной камерой прессования и усилием запираания 1200 тонн была отлита партия отливок картеров автоматической коробки передач (рис. 8) габаритами 320 × 290 × 210 мм, массой 4,190 кг и средней толщиной стенки 4 мм. Количество несоответствующей продукции составило 1,5 %.



Рис. 8. Отливка картера автоматической коробки передач из сплава AS31HP

ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Предложен состав нового сплава AS31HP системы Mg-Al-Si для литья под давлением отливок крупногабаритных деталей, обладающий хорошими литейными свойствами и повышенным сопротивлением ползучести при температуре до 150 °С. Сплав имеет следующий состав: магний - основа; алюминий - 2,5 - 3,4 %; кремний - 0,8 - 1,1 %; цинк - 0,11 - 0,25 %; марганец - 0,24 - 0,34 %; бериллий – 0,0005 - 0,0015 %; железо не более 0,004 %; медь не более 0,008 %; никель не более 0,001 %.

2. Для изучения процесса кристаллизации и формирования фазового состава сплавов системы Mg-Al-Si путем анализа тройной диаграммы состояния Mg-Al-Si впервые построены политермические разрезы данной диаграммы при постоянном содержании кремния 1 % и алюминия 3 %, а также изотермические разрезы при температурах 600, 450 и 300 °С. Теоретически установлено и экспериментально подтверждено, что при литье под давлением в отливках из сплавов системы Mg-Al-Si формируется специфическая структура, характеризующаяся образованием непрерывного “каркаса”, состоящего из двойной эвтектики (Mg)+Mg₂Si вокруг зерен твердого раствора на основе магния и изолированных включений тройной эвтектики (Mg)+Mg₂Si+γ-Mg₁₇Al₁₂.

3. В результате анализа свойств фаз и структурных составляющих микроструктуры сплавов системы Mg-Al-Si установлено, что повышенное сопротивление ползучести данных сплавов при температурах 140 – 170 °С обусловлено наличием в их микроструктуре теплостойкого непрерывного “каркаса” из двойной эвтектики (Mg)+Mg₂Si с температурой плавления 638 °С.

4. В результате механических испытаний образцов сплава AS31HP при температурах 20, 150 и 250 °С в литом состоянии (литье под давлением) и после отжига (1 час - 150 °С; 30 мин. - 250 °С) установлено, что различное содержание легирующих компонентов Al, Si, Zn и Mn в пределах границ сплава существенно не влияет на его прочностные свойства: $\sigma_B^{20} = 200...206$ МПа; $\sigma_B^{150} = 150...155$ МПа; $\sigma_B^{250} = 80...88$ МПа; $\sigma_{0,2}^{20} = 148...155$ МПа; $\sigma_B^{150} = 104...114$ МПа; $\sigma_B^{250} = 66...72$ МПа.

Сравнительный анализ механических свойств образцов сплавов AS21, AS31HP, AS41 и AZ91, а также типа AS31HP с содержанием кремния 0,44 %, изготовленных литьем под давлением и испытанных при температурах 20, 150 и 250 °С показал, что чем меньше содержится алюминия и больше кремния в сплаве, тем в меньшей степени он разупрочняется при повышении температуры испытаний.

5. С целью оценки теплостойкости нового сплава в условиях эксплуатации корпусных деталей трансмиссии автомобиля провели ряд сравнительных испытаний на ползучесть образцов, отлитых под давлением из сплавов AS21, AS41, AZ91 и AS31HP. Установлено, что при температуре 150 °С, нагрузке 35 МПа и времени испытаний в интервале 25 - 100 часов сплав AS31HP, имеющий деформацию $\delta_{100 \text{ ч}} = 0,15$ % превосходит по сопротивлению ползучести сплавы AZ91 ($\delta_{100 \text{ ч}} = 0,26$ %), AS41 ($\delta_{100 \text{ ч}} = 0,18$ %) и уступает по данному показателю сплаву AS21 ($\delta_{100 \text{ ч}} = 0,13$ %). Деформация образцов сплавов AS21,

AS31HP и AS41 с течением времени затухает. Вид экспериментальных кривых указанных сплавов совпадают по характеру с теоретической кривой низкотемпературной ползучести. В результате обработки экспериментальных данных установлена закономерность ползучести сплава AS31HP, которая имеет вид: $\delta = 3,57 \times \ln t - 3,4$.

Также в результате испытаний выявлено, что деформация ползучести сплавов AS21, AS41, AZ91 и AS31HP при повышении величины приложенного напряжения в диапазоне 35 - 55 МПа при температуре 150 °С в течение 100 часов увеличивается. Причем, чем меньше алюминия и больше кремния содержится в сплаве, тем в меньшей степени он деформируется при увеличении нагрузки.

6. В ходе оценки литейных свойств экспериментально установлено, что сплав AS31HP имеет меньшую жидкотекучесть (длина спирали $L = 324$ мм), чем сплавы AZ91 ($L = 394$ мм) и AS41 ($L = 342$ мм), но большую, чем сплав AS21 ($L = 285$ мм). Это объясняется тем, что при литье под давлением, чем больше содержание алюминия в сплаве, тем выше его жидкотекучесть. Сплав AS31HP более стоек к горячим трещинам, чем сплавы AZ91 и AS21. Наличие достаточного количества легкоплавкой тройной эвтектики в сплаве способствует залечиванию горячих трещин в отливках, несмотря на низкое содержание алюминия.

7. По результатам экспериментальных исследований разработана и освоена в промышленном масштабе технология приготовления сплава AS31HP с введением легирующих компонентов в расплав с помощью специальной лигатуры Al-Si-Mn следующего состава: Al – основа; Si 20,9 - 23,6 %; Mn 6,6 - 9,4 %. Даная технология обеспечивает хорошее качество сплава и относительно высокую степень усвоения кремния до 92,5 %, марганца до 73,3 %. Промышленное испытание сплава AS31HP успешно проведено в Германии в цехе литья под давлением автомобильного концерна DaimlerChrysler. Из сплава изготовлена партия отливок картеров автоматической коробки передач.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Пушкарев, С. Ю. Применение магниевых сплавов для литья под давлением автомобильных деталей / С. Ю. Пушкарев, М. Н. Игнатов // Сборник научных трудов международной научно - практической конференции «Проблемы и перспективы развития литейного, сварочного и кузнечно-штампового производства». - Барнаул: ГОУ ВПО АлтГТУ, 2002. – вып. 4. - С. 11-15.

2. Агалаков, В. В. Выбор технологических проб для исследования литейных свойств при литье под давлением / В. В. Агалаков, С. Ю. Пушкарев, И. П. Наумова, Л. В. Никулин, В. Н. Шишляев, М. Н. Игнатов // Вестник ПГТУ «Механика и технология материалов и конструкций».- Пермь: ГОУ ВПО ПГТУ, 2002.- №5. - С. 25-28.

3. Агалаков, В. В. Разработка технологии приготовления магниевых сплавов с кремнием для автомобильной промышленности / В. В. Агалаков, С. Ю. Пушкарев, Н. С. Падерина, М. Н. Игнатов // Вестник ПГТУ «Механика и технология материалов и конструкций». – Пермь: ГОУ ВПО ПГТУ, 2002. - №5. -С. 9-17.

4. Пушкарев, С. Ю. Разработка технологии приготовления магниевых сплавов с кремнием для автомобилестроителей на ОАО «АВИСМА» / С. Ю. Пушкарев,

М.Н. Игнатов // Сб. тезисов докладов областной научной конференции молодых ученых, студентов и аспирантов «Молодежная наука Прикамья – 2002». – Пермь: ГОУ ВПО ПГТУ, 2002. - С. 14.

5. Никулин, Л. В. Опыт разработки и применения магниевых сплавов для литья под давлением / Л. В. Никулин, М. Н. Игнатов, В. В. Агалаков, С. Ю. Пушкарёв, И. П. Наумова // Сб. тезисов докладов семинара «Состояние и проблемы производства магния и магниевых сплавов в России». – Березники: ОАО «АВИСМА Титано – магниевый комбинат», 2003. - С. 116-121.

6. Пат. 2218438 Российская Федерация, МПК7 С 22 С 23/02, 1/03. Сплав на основе магния и способ его получения / Тетюхин В. В., Агалаков В. В., Корнаухова Л. Ф., Пушкарёв С. Ю.; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество «АВИСМА титано-магниевый комбинат» - № 2001135786/02; заяв. 26.12.2001; опубл. 10.12.03, Бюл. № 34. – 16 с.: ил.

7. Pat. US7,135,079 B2 The United States of America, WO03/056050. Magnesium – based alloy and method for the production there of / Tetyukhin V. V., Agalakov V. V., Kornaukhova L. F., Pushkarev S. Y.; assignee Joint Stock Company “AVISMA-titanium-magnesium works” – appl. No 10/496,024; filed Apr. 22, 2002, pub. data Jan. 6, 2005, pub. No US 2005/0000605 A1. – 6 p.

8. Никулин, Л. В. Структура и свойства магниевых сплавов, отлитых под давлением / Л. В. Никулин, С. Ю. Пушкарёв, В. В. Агалаков, М. Н. Игнатов, С. В. Вшивков // Вестник ПГТУ «Машиностроение, материаловедение». - Пермь: ГОУ ВПО ПГТУ, 2007. - №3. – С. 113-118.

9. Никулин, Л. В. Теплофизические свойства магниевых сплавов для литья под давлением / Л. В. Никулин, С. Ю. Пушкарёв, К. В. Рыжаков // Вестник ПГТУ «Машиностроение, материаловедение». – Пермь: ГОУ ВПО ПГТУ, 2007. - №3. – С. 108-112.

10. Агалаков, В. В. Исследование свойств новых магниевых сплавов для литья под давлением автомобильных деталей / В. В. Агалаков, С. Ю. Пушкарёв, Л. В. Никулин // Литейное производство. – 2008. - № 3. - С. 27-30.

11. Пушкарёв, С. Ю. Формирование структуры и свойств специального магниевых сплава для литья под давлением / С. Ю. Пушкарёв, Л. В. Никулин // Литейщик России. - 2008. - № 8. - С. 43-47.

12. Агалаков, В. В. Разработка технологии приготовления магниевых сплава, легированного алюминием и кремнием / В. В. Агалаков, С. Ю. Пушкарёв, Л. В. Никулин // Цветные металлы. - 2009. - № 8. - С. 67-70.

Подписано в печать

Формат 60x84 1/16

Бумага писчая

Офсетная печать

Тираж 120

Заказ № ____

Ризография НИЧ ГОУ ВПО УГТУ-УПИ
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19